

**Заключение.** Таким образом, получен алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния круглой пластинки при магнитно-импульсном нагружении. Получены выражения распределения прогибов в радиальном направлении при продольно-поперечном изгибе пластинки, зоны распределения пластических деформаций.

**Список литературы:** 1. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 1. – Харьков: Изд. НТУ «ХПИ», 2001. – 272 с. 2. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И. Магнитно-импульсная обработка тонкостенных металлов. Том 2. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. – Харьков: Изд. МОСТ-Торнадо, 2002. – 284 с. 3. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов // Электротехника і електро механіка. – Харків: НТУ «ХПІ», – 2004. – № 2. – С. 80-84. 4. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. – Харьков: Вища школа, 1977. – 168 с. 5. Бидерман В.Л. Механика тонкостенных конструкций. – М.: Машиностроение, 1977. – 466 с. 6. Биргер И.А. Круглые пластинки и оболочки вращения. – М.: Оборонгиз, 1961. – 367 с. 7. Вайнберг Д.В., Вайнберг Е.Д. Пластины, диски, балки-стенки. – К.: Литература по строительству и архитектуре, 1959. – 1049 с.

*Поступила в редакцию 02.07.2008.*

УДК 539.3

**С.В.ЛЫСЕНКО**, канд.техн.наук;  
**М.М.СМИРНОВ**, канд.техн.наук; НТУ «ХПИ»

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ФЛАНЦА НА РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ЗАВАРИВАНИЯ БОЛТОВЫХ ОТВЕРСТИЙ**

Аналізуються різні режими заварювання зношених болтових отворів у фланцях головних циркуляційних насосів атомних електростанцій на основі розв'язання задачі термопластичності. За критерієм мінімальних залишкових деформацій фланця визначається найбільш ефективний режим з перехресною схемою заварювання отворів і попереднім прогріванням фланця до 250°C.

The different modes of welding of abrasion bolthole in flanges of main circulations pumps of nuclear power plants are analyzed on the basis of decision of problem of thermoplasticity. On the criterion of the minimum residual deformation of flange the effective mode is determinited. It is characterized by the cross chart of welding bolthole and preliminary warming up of flange to 250°C.

**1. Введение.** В работе исследуются детали главного циркуляционного насоса ГЦН-195М, который предназначен для создания циркуляции теплоносителя в замкнутом контуре энергетической установки ВВЭР. Этот тип реактора установлен на всех действующих 15 блоках атомных электростанций Украины, а также на некоторых зарубежных электростанциях. Каждый блок содержит четыре циркуляционные петли охлаждения, функционирование которых обеспечивается главным циркуляционным насосом. Особые требования к изготовлению и эксплуатации насоса обусловлены тем, что он находится в радиоактивном контуре АЭС. Насос размещается в герметичной защитной обо-

лочке и недоступен для проведения технического обслуживания во время работы реакторной установки. Однако предусмотрено проведение планово-предупредительных ремонтов выемной части ГЦН-195М.

К числу возможных ремонтных работ выемной части ГЦН относится ремонт крепежных соединений трубопроводов. В частности, требуется заваривать изношенные отверстия во фланцах, в которых крепятся дренажные трубки. Для последующей эксплуатации насосов в заваренных местах сверлятся новые отверстия и нарезается резьба. Однако при заваривании отверстий фланец нагревается неравномерно, что приводит к возникновению больших градиентов температур, остаточных пластических деформаций и недопустимому короблению поверхности фланца.

Для заваривания болтовых отверстий применяется ручная дуговая сварка плавящимися металлическими электродами с покрытием. Скорость нанесения наплавки заданной толщины зависит от силы сварочного тока, диаметра электрода и других факторов. Применение электродов с диаметром более 8 мм оказывается не эффективным, так как увеличивающийся при этом вес электрода и держателя приводит к быстрому утомлению сварщика. С другой стороны, можно повысить производительности процесса наплавки применением электродов, содержащих в покрытии железный порошок. В любом случае важное значение имеет квалификация сварщика [1].

Среди параметров, которые влияют на неравномерный нагрев фланца в процессе заваривания болтовых отверстий, следует выделить толщину шва и время наплавки на отдельном шаге. Большое значение имеет тип пошаговой схемы заваривания отверстий – последовательный или перекрестный. При последовательном способе заваривания отверстий, близлежащих к поверхности фланца, неравномерный нагрев в этой зоне усугубляется. Зато предварительный нагрев фланца может снизить конечные градиенты температур.

В работе предлагается методика моделирования и анализа режимов заваривания отверстий на основе решения нестационарной задачи теплопроводности и термоупругопластичности неравномерно нагретого фланца. Уменьшение неплоскостности поверхности фланца до допустимых значений является главным критерием при выборе наиболее эффективных режимов заваривания отверстий.

**2. Постановка задачи.** Чтобы смоделировать возможные режимы заваривания отверстий, необходимо корректно описать закономерности распространения тепла в теле фланце во времени при ступенчатом приложении температурной нагрузки на поверхностях сварных швов. Так как конечной целью исследования являются тепловое поле и деформации на поверхностях фланца, удаленных от очага заваривания отверстий, то вполне допустимы упрощенные представления о тепловых процессах в самом сварном шве. Не рассматриваются процессы отверждения и распространения тепла в сварных швах, а лишь задается температура на поверхностях отверстий, примыкающих к сварным швам.

Распространение тепла во фланце при заваривании отверстий описывается первым законом термодинамики, когда отсутствуют внутренние источники теплообразования, а тепло подводится через поверхности фланца, начиная с

момента времени  $t = 0$ :

$$\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \operatorname{div}\{q\} = 0, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность,  $C$  – теплоемкость,  $T$  – температура,  $t$  – время,  $\{q\}$  – вектор теплового потока. Согласно закону Фурье, тепловой поток пропорционален градиенту температур:

$$\{q\} = -[D] \cdot \operatorname{grad} T, \quad (2)$$

где  $[D]$  – матрица коэффициентов теплопроводности.

Комбинируя уравнения (1) и (2), получим разрешающее дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности:

$$\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3)$$

с граничными условиями первого рода (задается температура на кольцевых поверхностях отверстий, которые пошагово завариваются):  $T = T^*$ , и начальным условием:  $T|_{t=0} = T_{\text{unif}}$ , где  $T_{\text{unif}}$  – однородная температура в теле в начальный момент времени.

Для моментов времени с максимальными градиентами температур решается задача термоупругопластического деформирования в конечно-элементной постановке п/к ANSYS [2]. Диаграмма деформирования материала фланца моделируется билинейным кинематическим упрочнением, ассоциированным с законом течения и критерием Мизеса. Согласно ассоциированному закону течения:

$$\left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} = \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\} = \frac{3}{2\sigma_{\text{eqv}}} \left( \{s\} - \frac{2}{3} \frac{E \cdot E_T}{E - E_T} \int \{d\varepsilon^{\text{pl}}\} \right), \quad (4)$$

где  $Q$  – пластический потенциал,  $F$  – функция течения,  $\{s\}$  – вектор девиатора напряжений,  $\sigma_{\text{eqv}}$  – эквивалентное напряжение,  $\{d\varepsilon^{\text{pl}}\}$  – вектор приращений пластических деформаций,  $E$  – модуль Юнга,  $E_T$  – тангенциальный модуль из билинейной кривой  $\sigma(\varepsilon)$  одноосного растяжения материала фланца.

**3. Геометрическая и конечно-элементная модель фланца.** При создании геометрической модели фланца учитывались особенности распространения тепла и упругопластического деформирования фланца в процессе заваривания отверстий. Так как тепловое поле имело ярко выраженный локальный характер, то рассматривался усеченный в осевом направлении фланец. А с учетом циклической симметрии в окружном направлении, получили геометрическую модель четвертой части усеченного фланца, представленную на рис. 1<sup>1</sup>. Здесь смоделированы все отверстия (из них 4 – болтовые), которые находятся в зоне заваривания. Отдельно изображены конические объемы, увеличенные в масштабе, которые формируются при пошаговом заваривании отверстий. Угол конусности учитывает неравномерность износа резьбовых соединений. Разным цветом изображены части объемов, соответствующие минимально возможной толщине наплавки – 4 мм. В каждом болтовом отвер-

<sup>1</sup> Рисунки 1-6 расположены на цветной вкладке между стр. 132-133

стии созданы кольцевые конические поверхности, примыкающие к соответствующим сварным швам, что позволяет задавать температуру на отдельном шаге при решении нестационарной задачи теплопроводности.

Конечно-элементная модель фланца представлена на рис. 2. В местах отверстий реализована более густая сетка разбивки на конечные элементы. На внешней поверхности фланца выделены характерные узлы конечно-элементной сетки, для которых строятся графики изменения температуры во времени: черным цветом – для левого внутреннего узла под № 23027; красным цветом – для левого узла на ребре фланца под № 16946; фиолетовым цветом – для правого внутреннего узла под № 23015; синим цветом – для правого узла на ребре фланца под № 16952. На рис. 3 показано изменение температуры в этих узлах для одного из режимов заваривания отверстий.

**4. Анализ режимов заваривания отверстий.** Исследование режимов заваривания проводилось методом анализа величин и распределения градиентов температур, которые получены в результате решения нестационарной задачи теплопроводности. Наиболее рациональными считались режимы с минимальными градиентами температур на поверхности фланца, а именно, в характерных узлах. В итоге для подробного анализа были выбраны 4 режима заваривания отверстий, которые характеризовались перекрестной схемой пошагового заваривания, но отличались толщиной шва, временем заваривания и паузами между завариваниями на каждом шаге.

Если в первом режиме заваривания применялся равномерный шаг проварки для всех отверстий с толщиной шва 8 мм до 23-го шага и 4 мм до последнего 48-го шага, то во втором режиме использовался неравномерный шаг проварки с толщиной шва 4 мм только для верхних отверстий. Это позволило снизить общий уровень температур на поверхности фланца, однако градиенты температур при завершении заварки оставались достаточно высокими.

Поэтому был предложен третий режим, в котором сокращено время заваривания на отдельном шаге от 5 до 3 сек, что позволило снизить градиенты температур до 30 % на последнем шаге. В четвертом режиме заваривания применялся предварительный нагрев фланца до 250 °С. Общий фон температур повысился, однако градиенты температур снизились на 15 %. Поэтому четвертый режим заваривания можно считать наиболее рациональным из всех рассмотренных режимов. На рис. 4 представлено распределение градиентов температур в момент завершения заваривания отверстий. Указаны их численные значения в характерных узлах на поверхности фланца.

Для самых опасных моментов времени рационального режима заваривания – 723 сек (31-й шаг) и 1395 сек (59-й шаг), при которых градиенты температур достигают максимальных значений, выполнен анализ термоупругопластических деформаций. На рис. 5 и 6 показаны распределения полных перемещений по нормали к поверхности фланца. С учетом упругой разгрузки максимальные остаточные перемещения не превышают 0.15 мм, что удовлетворяет допустимому значению неплоскостности поверхности фланца. Это означает, что сварочные работы, выполненные в соответствии с параметрами чет-

Рисунки 1-6 к статье С.В.Лысенко, М.М. Смирнова «Исследование деформирования фланца на различных режимах заваривания болтовых отверстий»

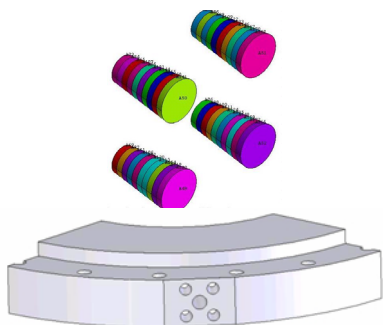


Рисунок 1 – Геометрическая модель сварных швов и четверти фланца

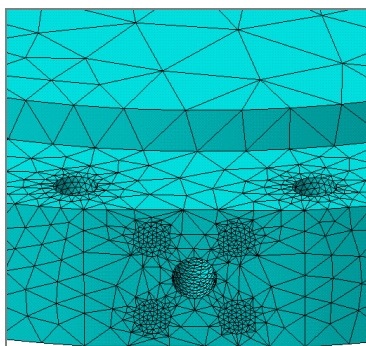


Рисунок 2 – Конечно-элементная модель фланца в зоне заваривания

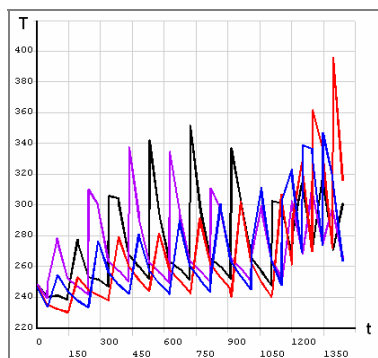


Рисунок 3 – Изменение температуры в узлах в процессе 4 режима заварки

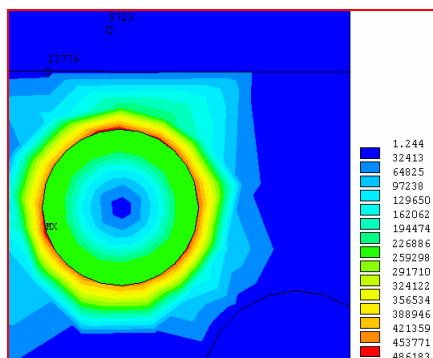


Рисунок 4 – Распределение градиентов температуры при t = 1395 сек

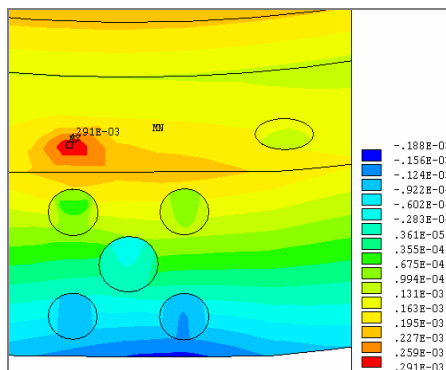


Рисунок 5 – Перемещения на 31 шаге

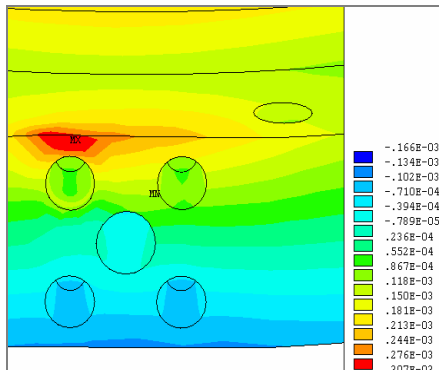


Рисунок 6 – Перемещения на 59 шаге

вертого режима, исключают необходимость сложной и трудоемкой технологической операции по устранению неплоскостности поверхности фланца.

**Список литературы:** 1.Талыпов Г.Б. Сварочные деформации и напряжения. – Л.: «Машиностроение», 1973. – 290 с. 2. Moaveni S. Finite element analysis. Theory and application with ANSYS. – New Jersey, 1999. – 526 p.

*Поступила в редколлегию 07.07.2008.*

УДК 621.318:37

**Г.Ю.МАРТЫНЕНКО**, канд.техн.наук, НТУ «ХПИ»

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛОВЫХ И ЖЕСТКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОСЕВОГО АКТИВНОГО МАГНИТНОГО ПОДШИПНИКА ПРИ ЗАДАННОМ ЗАКОНЕ УПРАВЛЕНИЯ**

У роботі запропонована методика розрахунку силових характеристик осьового активного магнітного підшипника двосторонньої дії зі статорами у вигляді броньових сердечників з відомим законом управління. Вона заснована на застосуванні методу скінченних елементів, магнітні сили розраховуються по тензору напружень Максвелла. Приведено результати розрахункових досліджень за визначенням пондеромоторних сил і коефіцієнтів жорсткості при різних параметрах управління.

In work the method of calculation of power descriptions of the axial active magnetic bearing of two-sided action with stators as the armoured mandrels with the known law of management is offered. It on application of the finite element method is based, and magnetic forces by Maxwell stress tensor are calculated. The results of calculations researches on determination of ponderomotive forces and coefficients of inflexibility at the different parameters of management are adduced.

**Введение.** Активные магнитные подшипники (АМП) являются альтернативой подшипникам качения, скольжения, газодинамическим и обладают по сравнению с ними целым рядом преимуществ (отсутствие смазочных систем, снижение потерь на трение, сравнительно большой зазор и т.д.) [1]. При математическом описании системы ротор на АМП выделяются следующие части: математическая модель ротора, модель подшипников и закон управления, который реализуется с помощью системы управления [2]. Корректное определение и проверка параметров алгоритмов управления с помощью численных экспериментов возможно только в случае адекватного математического моделирования системы ротор на АМП и взаимосвязанных магнитомеханических явлений происходящих в ней. При анализе ряда технических устройств уравнения электромеханических колебаний линеаризуют. Такой подход применяется и для АМП [1]. Так моделирование магнитомеханической системы ротор на АМП осуществляется с помощью дифференциальных уравнений движения и дифференциальных уравнения для токов в линейном приближении. При этом линеаризуются в окрестности положения равновесия токи в цепях и управляющие напряжения на обмотках [3]. Линейная модель подвеса записывается в предположении малости отклонений переменных от их номинальных